中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 315 ~ 329
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com





评 述 中国综合地层和时间框架专辑

中国新近纪综合地层和时间框架

邓涛[1,2,3,4*], 侯素宽[1,3], 王世骐[1,2]

1. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044;
2. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京 100044;
3. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;
4. 南京大学地球科学系, 南京 210023
* E-mail: dengtao@ivpp.ac.cn

收稿日期: 2017-07-02; 收修改稿日期: 2017-11-26; 接受日期: 2017-11-30; 网络版发表日期: 2018-04-11
国家自然科学基金重点项目(批准号: 41430102)、中国科学院战略性先导科技专项B类项目(编号: XDPB05)、中国科学院前沿科学重点研究项目(编号: QYZDY-SSW-DQC022)、科技基础性工作专项项目(编号: 2015FY310100-14)和全国地层委员会专项项目(编号: DD20160120-04)资助

摘要 中国的新近纪陆相地层出露广泛, 具有在欧亚大陆上建立精确地层系统的最优良条件, 而演化迅速的哺乳动物是划分对比新近纪陆相地层的有效手段. 因此, 在中国很早就已经建立起统一的新近纪哺乳动物生物地层框架, 命名了哺乳动物分期. 由于地质年代"期"与年代地层单位"阶"的对应关系, 中国新近系有了连续的7个阶, 自下而上分别为中新统的谢家阶、山旺阶、通古尔阶、灞河阶、保德阶, 以及上新统的高庄阶和麻则沟阶. 近年来以一系列研究成果为依托, 在连续剖面上, 将精细的生物地层学与古地磁和同位素等年代学方法相结合, 建立和完善了有地质年龄标定的中国新近系年代地层序列. 除通古尔阶的底界与欧洲陆生哺乳动物分期的底界对比外, 其余各阶的底界年龄均与国际地层年表中海相各阶的底界年龄一致. 在生物标志上, 中国新近系的阶都力求用哺乳动物单一种的首现作为参考, 其中一些代表了地方性的物种更替, 还有一些代表了洲际的动物迁徙扩散事件. 中国新近系的各阶都按照现代地层学的原理和规则提出了底界层型的候选剖面, 在此基础上对各大区域的新近纪地层进行了全面的对比.

关键词 新近系, 阶/期, 哺乳动物, 生物地层, 年代地层, 磁性地层, 中国

1 概论

在国际地层委员会的有力领导下和全球地层学工作者的不懈努力下, 最近30年来的地层工作有了突飞猛进的发展, 一个以海相地层为基础的国际地层年代框架已经建立. 得益于对地中海沿岸地区海相微体生物化石的细致研究, 新近纪的年代地层工作在这一进展中表现得相当突出, 国际年代地层表中新近系的8个阶已有6个建立了底界层型, 余下的兰盖阶 (Langhian)和布迪加拉阶(Burdigalian)也有精确的底界年龄. 以海相地层为标准, 各大洲广泛分布的新近纪陆相地层可进行很好的海陆对比(Ogg等, 2016).

中国的新近纪地层以陆相沉积为主, 但生物地层工作在1978年以前更侧重于对哺乳动物化石的描述,

中文引用格式: 邓涛, 侯素宽, 王世骐. 2019. 中国新近纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 315–329, doi: 10.1360/N072017-00221
英文引用格式: Deng T, Hou S K, Wang S Q. 2019. Neogene integrative stratigraphy and timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 310–323, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9155-4

其他门类化石仅限于地方性报道, 年代地层工作并没有得到应有的重视. Chiu等(1979)回顾总结了中国中新世哺乳动物群的研究工作, 首次提出了这些动物群的年代排序方案. 李传夔等(1984)、Qiu(1989)、邱占祥和邱铸鼎(1990)、Qiu和Qiu(1995)、Tedford (1995)、童永生等 (1995)、Qiu等(1999)、Deng (2006)、Qiu等(2013)、Woodburne等(2013)、Deng和Hou(2014)相继建立和修订了中国新近纪哺乳动物期的划分方案. 2000年第三届全国地层会议以来, 中国新近系的建阶工作得到极大推进, 在哺乳动物分期的基础上依据《国际地层指南》(Salvador, 1994)的原则, 将中国的新近系划分为中新统的谢家阶、山旺阶、通古尔阶、灞河阶、保德阶, 以及上新统的高庄阶和麻则沟阶, 这一方案已应用到《中国地层表》中(王泽九等, 2014).

另一方面, 由于陆相地层的划分主要依据陆生哺乳动物化石, 而哺乳动物本身在分布上具有强烈的地域性, 且通常数量稀少、保存破碎, 导致在陆相地层划分对比的原则、方法和工作程序上尚未有严格的国际性标准. 然而, 在欧亚大陆上中国比欧洲更具备建立精确的新近纪生物地层层序的条件(Tedford, 1995), 因为欧洲新近纪的陆相盆地沉积不那么发育, 很多著名的哺乳动物群均发现于裂隙堆积中; 此外, 由于古地磁测年方法在中国新近纪地层中的广泛应用, 同位素年龄测定较少的缺陷已得到有效克服.

2 中国新近纪年代地层的划分沿革

中国的新近纪地层分布广泛, 尤其是在北方地区, 其中赋存的哺乳动物化石很早就受到古生物学家的注意. Falconer (1868)对产自西藏札达盆地的哺乳动物化石的报道虽然只有很少的一些碎片, 却开创了对中国新近纪哺乳动物化石的研究, 并且实际上还是首次对中国脊椎动物化石的科学研究. 此后, Koken(1885)根据华北的新近纪化石标本建立了李氏三趾马(*Hipparion richthofeni*), 虽然其产出地点不详, 但时代意义却相当重要. Andersson(安特生)自1916年开始领导的华北新生界调查成绩丰硕, 1918年在河南新安发现了含三趾马化石的地层, 接着在山西保德现在确认是晚中新世的“三趾马红土”中采集到丰富的哺乳动物化石, 并进行了详细的研究. 几乎与此同时, 美国自然历史博物馆(AMNH)在蒙古高原发现了中中新世的通古尔铲齿象动物群, 也持续开展了系统研究. 另一项重要的发现是主要由Licent(桑志华)在20世纪30年代采集的以山西榆社为代表的上新世哺乳动物化石, 研究工作由Teilhard de Chardin(德日进)等人进行, 而Frick同一时期在榆社等地采集的化石收藏在美国自然历史博物馆, 但研究工作滞后 (Tedford等, 2013). 30年代其他重要的新近纪化石发现和研究还有杨钟健的山东山旺早中新世动物群以及Bohlin的柴达木盆地中新世动物群等. 上述这些成果由德日进和罗学宾进行了总结, 依据动物群建立了中国的新近纪地层顺序(Teilhard de Chardin和Leroy, 1942).

新中国成立后的新近纪地层工作继续推进, 发现了更多重要的化石地点, 如陕西蓝田、西藏吉隆和布隆、云南禄丰、青海谢家, 以及一些经典地点的再发掘和再研究, 如内蒙古二登图和山西榆社等. 研究工作不仅仅是对各哺乳动物群进行排序, 而是逐渐建立起新近纪的年代地层框架.

Chiu等(1979)的工作将中国新近纪的地层以哺乳动物化石为依据, 按照岩石地层单位"组"进行分期排序. 李传夔等(1984)根据哺乳动物的进化水平, 首次将中国的新近纪划分为7个期, 即早中新世谢家期、中中新世早期山旺期、中中新世晚期通古尔期、晚中新世灞河期、最晚中新世保德期、早上新世静乐期、晚上新世游河期, 并特别侧重于与欧洲新近纪陆生哺乳动物分期进行对比.

邱占祥和邱铸鼎(1990)将山旺期调整为早中新世晚期; 华北晚中新世灞河期并入保德期, 华南晚中新世为禄丰期; 上新世则用榆社期代替静乐期和游河期, 以高庄动物群和麻则沟动物群分别代表上新世的早、晚期. 1999年全国地层委员会正式建立了上新世的高庄期和麻则沟期, Deng (2006) 则恢复了灞河期.

近年来新发现了若干地层出露良好且富含哺乳动物化石的新地区, 如宁夏同心、内蒙古中部、新疆准噶尔盆地北缘、甘肃临夏盆地等, 并在若干经典地区开展了古地磁测年工作. 在这些工作的基础上, 由于年代地层的“阶”对应于地质年代的“期”, 因此一个由哺乳动物分期演变而来的中国新近系年代地层系统已经建立, 即下中新统下部谢家阶、下中新统上部山旺阶、中中新统通古尔阶、上中新统下部灞河阶、上中新统上部保德阶、下上新统高庄阶、上上新统麻则沟

阶, 并与国际地质年表中依据海相地层建立的年代系统进行了对比(Qiu等, 2013).

3　中国新近系综合年代地层框架

尽管国际地层委员会早已经明确地将年代地层分类定位为地层划分的终极目标, 其目的乃是建立一个标准全球年代地层表(Hedberg, 1976). 然而, 《国际地层指南》(Salvador, 1994) 明确提到, 区域性的阶(期)和统(世)可能总是需要的; 阶的界线层型最好是海相沉积(某些情况除外, 如在第三纪非海相序列中以哺乳动物群为依据建立的一些阶). 因此, 《国际地层指南》容许在含哺乳动物化石的陆相地层建立区域性的阶/期. 在中国, 作为建立新近纪陆相年代地层系统生物基础的不同阶的哺乳动物综合分布和系统演化已由Qiu等(2013, figs. 1.2, 1.3, 1.7) 进行总结.

在新近纪陆相阶的底界定义方面, 目前存在两种观点: 一种观点是将陆相阶的底界与海相阶完全等同, 另一种观点是依据哺乳动物化石来定义阶的底界. 由于哺乳动物化石的首现和末现难于确定, 且海陆不同的界线增加了地层划分对比的复杂性, 因此我们倾向于尽可能以海相分阶的标准作为新近系陆相分阶的定义, 同时以哺乳动物化石作为判断界线位置的辅助标志. 在具体实践中, 陆相阶界线层型的确定仍然按照《国际地层指南》的基本要求, 即: 应是易于识别并可在本区域范围内追索到的、具实践意义的、明显的标志面, 如生物带界线、磁极反转, 以及易于用各种同位素或其他地质测年方法进行精确测年的地层层段.

3.1　谢家阶

谢家阶为中国新近系下中新统的第一个阶, 得名于青海省湟中县田家寨乡谢家村. 地质部青海省地质局石油普查队在1978年命名了西宁盆地的谢家组, 李传夔和邱铸鼎(1980)将在谢家组中发现的一批以小哺乳动物为主的化石命名为谢家动物群, 这是在中国发现的第一个早中新世哺乳动物群. 随后, 李传夔等(1984)以谢家动物群为代表命名了中国新近纪分期中的谢家期, 时代为早中新世. 1999年第二届全国地层委员会正式提出建立"谢家阶"的年代地层单位.

谢家阶的候选层型剖面位于谢家村北的车头沟内, 从坡脚到山顶依次发育马哈拉沟组、谢家组、车头沟组和咸水河组. 谢家组与马哈拉沟组和车头沟组均为整合接触. 谢家动物群以小哺乳动物化石为主, 包括兔形目的*Sinolagomys pachygnathus*, 啮齿目的*Cricetodon youngi*、*Parasminthus xiningensis*、*P. huangshuiensis*、*Litodonomys lajeensis*、*Yindirtemys suni*、*Y. xiningensis*、*Tachyoryctoides kokonorensis*, 奇蹄目的*Turpanotherium elegans*, 偶蹄目的*Sinopalaeoceros xiejiaensis*(Qiu等, 2013).

根据定义, 中国新近系下中新统谢家阶应与国际地层年表中的阿基坦阶(Aquitanian)对比, 其底界的古地磁标志为C6Cn.2n的底部, 年龄为23.03Ma(Steininger等, 1997). C6Cn.2n在谢家剖面未能清楚呈现, 这条界线可能位于谢家组下部的棕红色块状泥岩连续沉积中, 距谢家组底部14m(图1).

尽管青海西宁盆地的谢家剖面是谢家阶的命名地点, 且可能包含谢家阶底界的古地磁标志, 却缺乏底界的哺乳动物化石标志, 谢家动物群与底界之间尚有20m的垂直距离. 谢家阶内包含NMU(Neogene Mammal Unit)1~3化石带, 谢家动物群相当于NMU2, 而在谢家阶底界之上的NMU1是新疆准噶尔盆地北缘的索索泉动物群(Qiu等, 1999).

准噶尔盆地北缘铁尔斯哈巴合剖面构造简单并含有丰富的晚渐新世及早中新世哺乳动物化石, 以兔形类、啮齿类和食虫类等小哺乳动物为主. 该地区的铁尔斯哈巴合组含两个化石带(铁-I, II带), 索索泉组下部含3个化石带(索-I, II, III带), 其中索-I带为渐新世末期, 索-II带为中新世初期(孟津等, 2006). 铁尔斯哈巴合剖面包含地磁极性表中相当于C7n~C5E段的完整磁极带, 即穿越了渐新世-中新世界线, 因此也被推荐为谢家阶底界的候选层型剖面, C6Cn.2n底部位于索索泉组底部向上7.25m处, 处在索-I带之上. 啮齿动物*Democricetodon sui*的首现被作为谢家阶底界的生物标志, 但包含这一化石的索-II带并不产于铁尔斯哈巴合剖面, 而是约10km之外的另一个化石地点(Meng等, 2013), 因此这个剖面作为候选层型剖面的缺点也相当明显.

谢家期的哺乳动物演化特征表现为: 渐新世常见的圆柱鼠科(Cylindrodontidae)、拟速掘鼠科(Tachyoryctoididae)、双柱鼠科(Distylomyidae) 和雷兽科(Brontotheriidae)等在谢家期极少或不再出现; 塔塔鼠科(Tataromyidae)和在渐新世晚期曾繁盛一时的一些属,

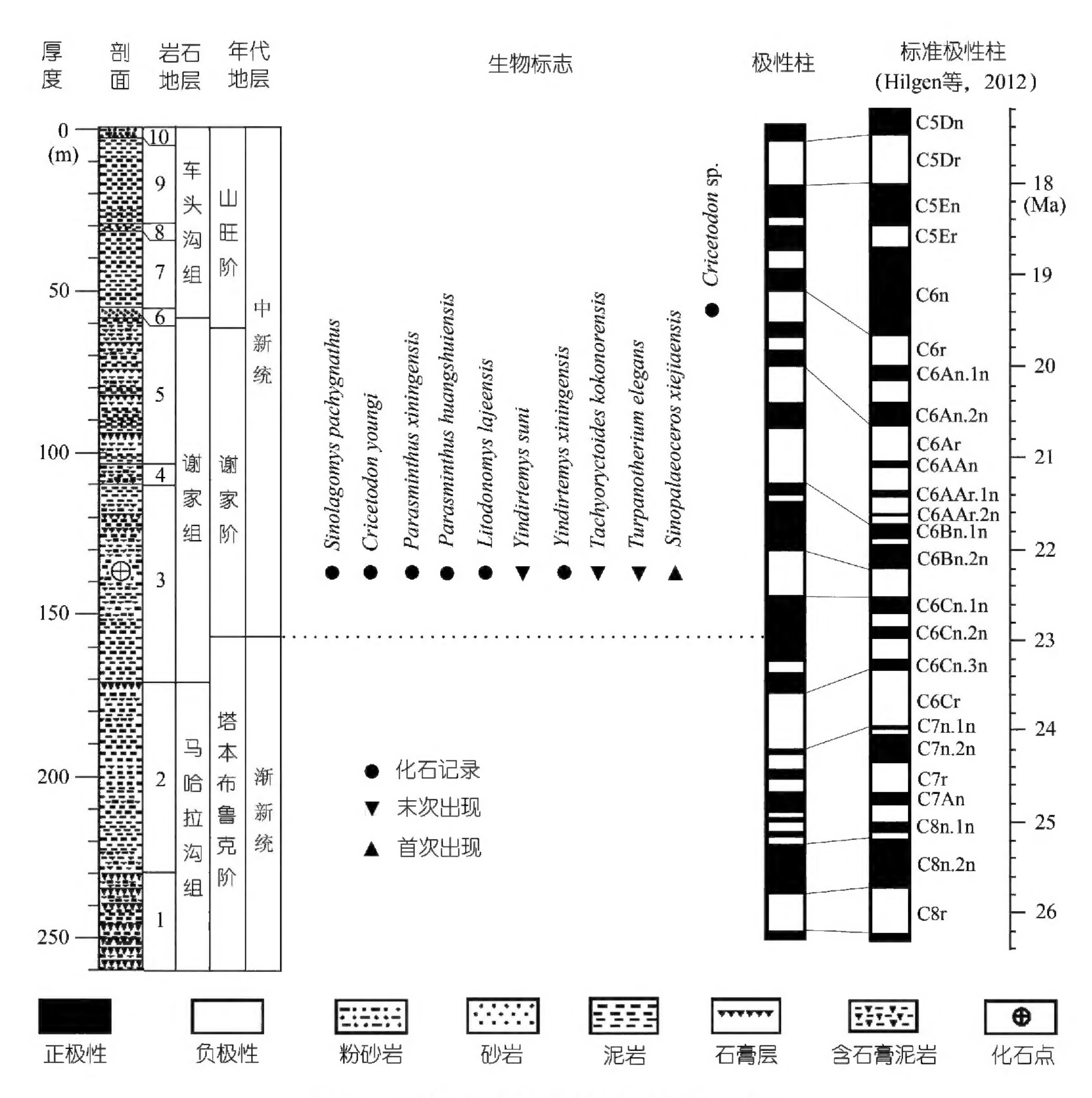


图 1　青海西宁盆地谢家地点地层综合剖面

如林跳鼠科的副蹶鼠(*Parasminthus*)、梳齿鼠科的阴河鼠(*Yindirtemys*)、巨犀科的吐鲁番巨犀 (*Turpanotherium*)、爪兽科的掠叶爪兽(*Phyllotillon*)和牛科的中华古羊(*Sinopalaeoceros*) 在谢家期最后一次出现, 此后即消失. 首次出现的属包括食虫目的中新猬(*Mioechinus*)和鼩鼹 (*Quyania*), 以及啮齿目的*Sayimys*、 *Ansomys*、*Sinotamias*、 *Microdyromys*、 *Sicista*、*Cricetodon*、*Democricetodon*、*Protalactaga*等(Qiu等, 2013). 谢家期的一些属为渐新世残存下来的成员, 但它们的种都比渐新世相应属的种进步. 因此, 可以认为谢家期动物群属于贫化和特化了的渐新世动物群, 具有从渐新世向中新世动物群过渡的特色 (童永生等, 1995).

3.2　山旺阶

山旺阶为中国下中新统的第二个阶, 得名于山东省临朐县上林镇山旺村. 杨钟健创立“山旺系”一名, 其内涵是指覆盖于“青山系” (即现在的牛山组玄武岩)之上一套富含动、植物化石的含凝灰质砂、砾岩及薄层硅藻土页岩, 时代定为早中新世或中中新世(Young, 1936), 后改称“山旺系”. 随着工作的推进, 山旺盆地一带新生代地层被三分, 上部为尧山组, 中部为山旺组, 下部为牛山组(郑家坚等, 1999). 李传夔等(1984)以山旺组所含的山旺动物群命名了山旺期, 并把江苏泗洪和方山等动物群归入这一时期. 1999年第二届全国地

层委员会正式提出建立“山旺系”的年代地层单位，其时限与中国陆生哺乳动物分期的山旺期对应.

山旺为一小型盆地，主体出露约0.3km^2. 山旺阶的典型剖面位于盆地南部的角岩山和老母钱沟. 山旺组的沉积物，特别是硅藻土中含有丰富的动植物化石，其中以哺乳动物化石最具时代意义，是进行陆相地层划分和对比的主要依据.

过去对山旺期的定义中都没有明确指出其下限的生物标志，而只是笼统地叙述了整个期内的哺乳动物演化特征. 由于山旺期被定义为与欧洲的Orleanian期相当，而后者的下限以安琪马(*Anchitherium*)首次出现事件为标志，与此类比，中国山旺期的下限或山旺阶的底界也以安琪马的首次出现为生物标志. 由于Orleanian期的下限与国际地层年表中的布迪加拉阶的底界一致(Steininger, 1999)，而后者的候选GSSP的定义是靠近Chron C6An的顶部，年龄为20.44Ma(Hilgen等, 2012)，因此山旺阶的底界年龄应为20.44Ma. 不过，由于地层缺失，山旺组的底部年龄为18Ma(He等, 2011)，与其下伏的牛山组之间有沉积间断，因此在山旺剖面上并不存在山旺阶的底界. 甘肃临夏盆地(Deng等, 2013)和内蒙古中部地区(Wang等, 2009)有下中新统沉积出露，并有山旺阶最底部的化石和适合于古地磁分析的沉积物，因此，是有可能建立山旺阶底界界线层型的有利地点. 例如，临夏盆地的广河大浪沟剖面产有豖脊齿象化石(*Choerolophodon guangheensis*, Wang和Deng, 2011)，其古地磁年龄约为20Ma，可能是中国最早出现的长鼻类化石，可以作为山旺阶的底界生物标志；内蒙古苏尼特左旗敖尔班剖面的下敖尔班动物群的古地磁年龄为20~20.3Ma，非常接近定义的山旺阶底界，动物群中首现的啮齿类*Atlantoxerus*、*Miodyromys*、*Keramidomys*、*Ligerimys*(Qiu等, 2013)也可以作为底界的生物标志.

山旺阶(期) 的哺乳动物演化特征表现为: 从渐新世残留下来的大部分科已经或几乎绝迹，现生的科或亚科出现，如鼯鼠亚科(Petauristinae)、熊科(Ursidae)、长颈鹿科(Giraffidae)、鹿科(Cervidae) 等. 大量新属出现于山旺期，如食虫目的*Mioechinus*，兔形目的*Alloptox*，啮齿目的*Ansomys*、*Prodistylomys*、*Distylomys*、*Miodyromys*、*Keramidomys*、*Diatomys*、*Apeomys*、*Leptodontomys*、*Protalactaga*、*Megacricetodon*，食肉目的*Amphicyon*、*Phoberocyon*、*Ballusia*、*Semigenetta*、*Pseudaelurus*，长鼻目的*Platybelodon*、*Stegolophodon*，奇蹄目的*Anchitherium*、*Anisodon*、*Plesiaceratherium*，偶蹄目的*Hyotherium*、*Ligeromeryx*、*Dorcatherium*、*Sinomeryx*、*Turcocerus*等. 一系列属在山旺期末次出现，如食虫目的*Amphechinus*、*Metexallerix*，啮齿目的*Prodistylomys*、*Ligerimys*、*Asianeomys*、*Plesiosminthus*、*Litodonomys*、*Cricetodon*，奇蹄目的*Diaceratherium* (Qiu等, 2013). 总之，哺乳动物在山旺期进入了演化上的一个崭新时期: 啮齿目真正开始了以松鼠形类和鼠形类占统治地位的时期; 肉齿目被新肉食类所代替; 长鼻目出现; 奇蹄目没落，古老的奇蹄类已绝灭，只有犀科、爪兽科和马科中新出现的安琪马属较常见；反刍类明显分化. 但是，生存于这一时期的哺乳动物几乎所有的属都未能延续至今，因此可以认为山旺期仅仅是开始了一个哺乳动物现代化的时期(童永生等, 1995).

3.3　通古尔阶

通古尔阶为中国新近系中中新统的阶，得名于内蒙古苏尼特左旗赛汉高毕苏木东南15km的通古尔台地. 美国自然历史博物馆第三中亚考察团的Spock (1929) 将这个台地上的地层命名为通古尔(Tung Gur)组，名称来自此处一口叫古尔通卡拉乌苏(Gur Tung Khara Usu)的水井名字的前半部分颠倒. 通古尔组主要由河流相沉积构成，最大厚度接近80m，可以分为两段沉积: 上段主要为灰白色砂岩和杂色泥岩，偶夹灰色泥灰岩，在通古尔台地北缘和西缘出露良好; 下段为相当均匀的红色或褐红色泥岩，中夹一层河道砂岩，出露在台地南缘的推饶木，在台地北缘的阿勒特希热剖面下部也能见到. 两段地层都富含化石(Wang等, 2003; Deng等, 2007).

李传夔等(1984)以通古尔动物群为代表建立了中中新世的通古尔期，大致相当于欧洲陆生哺乳动物分期的Astaracian期(Steininger, 1999). 1999年第二届全国地层委员会正式提出建立“通古尔阶”的年代地层单位，其时限与中国陆生哺乳动物分期的通古尔期对应.

通古尔阶的层型剖面位于通古尔台地东南缘的推饶木，该地点只有通古尔组出露，未见下伏地层，其上被第四纪的黄色砂砾掩盖，剖面厚35.6m. 推饶木剖面的沉积序列清楚，岩性由上部的红色泥岩、中部的河道砂岩和下部的红色泥岩组成. 上红泥岩颜色较浅，

偏向桔黄, 含有较多由古土壤形成的彩色条带; 下红泥岩颜色较深, 岩性均一, 缺乏水平条带.

通古尔阶底界的古地磁标志是C5Bn.1r的底部, 年龄为15Ma, 以戈壁跳兔*Alloptox gobiensis*和葛氏铲齿象*Platybelodon grangeri*的首现为其生物标志. 这条界线在推饶木剖面位于下部红色泥岩的连续沉积中, 距中部砂岩的底部7.6m(Deng等, 2007). 通古尔阶的底界与国际地层表中的阶并不一致, 因此Qiu等(2013)认为通古尔阶的底界应该下移, 以宁夏同心地区的丁家二沟动物群或甘肃临夏盆地的石那奴动物群为依据, 从而与海相的兰盖阶 (Langhian) 底界一致, 即古地磁C5Cn.1n的年龄15.97Ma(Hilgen等, 2012).

通古尔期哺乳动物的进化具有如下特点: 长鼻目开始大规模辐射, 反刍类开始分异. 时间间隔由跳鼠科(Dipodidae)和鬣狗科(Hyaenidae)的首次出现确定. 出现的新属包括啮齿类的*Sinotamias*、*Gobicricetodon*, 食肉类的*Protictitherium*、*Metailuru*, 偶蹄类的*Palaeotragus*、*Euprox*、*Micromeryx*、*Hispanomeryx*等. 兔形目的*Alloptox*, 啮齿目的梳齿鼠科 (Ctenodactylidae)、拟速掘鼠科(Tachyoryctoididae), 灵长目的*Pliopithecus*, 食肉目的*Hemicyon*, 长鼻目的*Platybelodon*, 奇蹄目的*Anisodon*、*Plesiaceratherium*、*Hispanotherium*, 偶蹄目的*Ligeromeryx*、*Stephanocemas*、*Turcocerus*等在本期末次出现(童永生等, 1995; Qiu等, 2013).

3.4 灞河阶

灞河阶为中国新近系上中新统的第一个阶, 得名于流经陕西省蓝田县的灞河. 蓝田地区沿灞河分布的沉积地层是中国最好的上中新统生物地层剖面之一, 刘东生等(1960)命名了灞河组. 灞河组在灞河南岸大部分地区都没有见底, 在白鹿塬的西端和骊山的西坡灞河组与下伏的寇家村组则为不整合接触. 灞河组主要由棕红色泥岩和砂质泥岩、灰白色砂岩和砂砾岩组成, 底部为砾岩. 不整合于下伏中中新统寇家村组之上, 与上覆上中新统蓝田组也呈不整合接触. 李传夔等 (1984)创建灞河期, 并与欧洲新近纪陆生哺乳动物分期的瓦里西期(Vallesian)(Steininger, 1999)相对比, 灞河阶即对应于灞河期.

对蓝田地区的古地磁测定结果显示, 灞河组的年龄为11~6.8Ma(Kaakinen, 2005). 将灞河阶底界与海相的托尔托纳阶(Tortonian) 底界11.63Ma(Hilgen等, 2005) 对比, 则蓝田地区的灞河组并未包含晚中新世最早期的地层, 这里也就没有灞河阶底界存在.

甘肃临夏盆地的柳树组岩性均一, 为褐红色粉砂质泥岩, 即典型的红粘土沉积. 柳树组下部的大深沟动物群与灞河动物群相似, 而柳树组底部的郭泥沟动物群含有晚中新世最早期的化石, 且下伏通古尔阶地层, 剖面连续. 灞河阶底界层型剖面位于甘肃省临夏回族自治州东乡县那勒寺乡郭泥沟村北一条冲沟内, 地层出露良好, 下部为中中新统下部东乡组、中部为中中新统上部虎家梁组、上部为上中新统柳树组(邓涛等, 2015).

郭泥沟动物群代表了灞河沟阶最底部的动物群, 包括不少首次出现的化石属, 对灞河阶的底界有重要的指示意义, 如*Dinocrocuta*、*Machairodus*、*Konobelodon*、*Hipparion*、*Nestoritherium*、*Parelasmotherium*、*Ningxiatherium*和*Shaanxispira*等. 在古北区的陆相地层中, 上中新统的底界很长一段时间以来都是以三趾马(*Hipparion*) 的首次出现作为标志. 郭泥沟动物群中的东乡三趾马(*Hipparion dongxiangense*)是中国已知最小的三趾马, 其强烈的次尖收缩和宽深的次尖沟是北美中中新世三趾马类的常见特征. *H. dongxiangense*的首次出现作为灞河阶和上中新统的底界生物标志, 其层位接近年龄为11.63Ma的C5r.2n之底(Fang等, 2016), 是欧亚陆最早的三趾马化石地点, 而且这一界线年龄恰好与海相的托尔托纳阶底界一致(邓涛等, 2015).

相比通古尔期, 灞河期的哺乳动物群进入了更为现代化的时期: 啮齿目中的鼠形类占绝对统治地位, 始鼠科、睡鼠科继续衰退, 同时出现了鼢鼠科和鼠科动物, 仓鼠科中的近代仓鼠(Cricetinae)完全取代了中中新世的古仓鼠(邱铸鼎和李强, 2016). 食肉目中的鼬科、鬣狗科和猫科开始繁盛; 长鼻目的数量显著减少; 奇蹄目以三趾马属和大唇犀属占优势, 爪兽科和貘科多样性较低、个体数量很少; 反刍类和其他偶蹄类更加蓬勃发展. 一个在高阶元组成上与现代哺乳动物相似的格局已经形成(童永生等, 1995). 通古尔期许多常见的属这时已几乎绝灭, 大量新的属出现, 如兔形目的*Ochotona*, 啮齿目的*Castor*、*Lophocricetus*、*Sinozapus*、*Paralactaga*、*Dipus*、*Brachyscirtetes*、*Nannocricetus*、*Kowalskia*、*Sinocricetus*、*Microtoscoptes*、

Abudhabia、*Prosiphneus*、*Pararhizomys*, 食肉目的*Indarctos*、*Agriotherium*、*Sinictis*、*Parataxidea*、*Melodon*、*Eomellivora*、*Promephitis*、*Adcrocuta*、鼬鬣狗类、*Machairodus*, 长鼻目的*Prodeinotherium*、*Tetralophodon*, 蹄兔目的*Pliohyrax*, 奇蹄目的*Sinohippus*、*Hipparion*、*Chilotherium*、*Shansirhinus*、*Tapirus*, 偶蹄目的*Chleuastochoerus*、*Schansitherium*、*Honanotherium*、*Cervavitus*、*Gazella*、*Sinotragus*等, 它们组成了作为新近纪特征的所谓三趾马动物群(Qiu等, 2013). 在这些属中, 包含少数现生成员, 如*Castor*、*Ochotona*、*Tapirus*、*Gazella*等属. 末现的属包括食虫目的*Mioechinus*, 兔形目的*Desmatolagus*, 啮齿目的*Ansomys*、*Keramidomys*、*Heterosminthus*、*Protalactaga*、*Democricetodon*、*Megacricetodon*、*Gobicricetodon*, 偶蹄目的*Euprox*等.

3.5 保德阶

保德阶为中国中新统的最后一个阶, 得名于山西省保德县. 1920年桑志华在甘肃庆阳地区采得十分丰富的晚中新世晚期哺乳动物化石. 几乎同时, 安特生在山西保德也发现了同期的哺乳动物化石, 由Zdansky从1922年开始进行系统的发掘和征集. 裴文中等(1963)命名了保德阶, 虽然没有正式指定层型剖面, 但所指明确, 即Zdansky所称的山西保德"三趾马红土", 李传夔等(1984) 将保德期对应于欧洲的吐洛里期(Turolian).

保德地区的保德组地层以不整合下伏石炭系灰岩, 上覆上新统静乐组. 古地磁对比显示保德组(不带底砾)为8~5.2Ma(岳乐平等, 2004), 而吐洛里期的底界位于古地磁C4r.2r之底, 年龄为8.7Ma(Steininger, 1999), 显然保德组未达此界线, 因此这个对比方案已废弃.

保德地区是保德阶的命名地点, 剖面出露良好、哺乳动物化石丰富, 含有保德期的典型种类副鬣狗(*Adcrocuta*)、鼬鬣狗类、后猫(*Metailurus*)、中型三趾马、大唇犀(*Chilotherium*)和弓颌猪(*Chleuastochoerus*)等. 保德阶的层型剖面位于保德县腰庄乡冀家村南主沟南侧支沟中, 三趾马红土共分13层, 总厚约60m. 保德阶底界被确定为与海相墨西拿阶(Messinian)底界一致, 即在古地磁Chron C3Br.1r之内, 年龄为7.25Ma(Hilgen等, 2000). 这条界线位于冀家沟剖面第9层之内, 恰好在化石层之下, 首次出现的福氏三趾马(*Hipparion forstenae*) 可以作为保德阶底界的生物标志. *H. forstenae*的分布广泛, 在山西保德和霍县、甘肃秦安和临夏、西藏吉隆和聂拉木都有发现, 且都只存在于晚中新世晚期(图2).

保德期盛产三趾马动物群化石, 主要为大、中型哺乳动物, 以鼬鬣狗类、大唇犀类和中等体型三趾马为典型代表. 小哺乳动物的始鼠科、山河狸科和林跳鼠科继续衰退或绝灭, 跳鼠科有所发展, 仓鼠科和鼠科出现了高度分化, 种类和数量达到空前的繁荣 (邱铸鼎和李强, 2016). 首现的属有食虫目的*Erinaceus*、*Parasoriculus*、*Paenelimnoecus*, 兔形目的*Alilepus*, 啮齿目的*Dipoides*、*Myominus*、*Paralophocricetus*、*Apodemus*、*Micromys*、*Huaxiamys*、*Orientalomys*, 食肉目的*Plesiogulo*、*Enhydriodon*, 长鼻目的*Anancus*、*Sinomastodon*、*Mammut*、*Stegodon*, 奇蹄目的*Dihoplus*. 末现的属包括啮齿目的*Miodyromys*、*Microdyromys*、*Leptodontomys*、*Microtoscoptes*、*Abudhabia*、*Prosiphneus*, 食肉目的*Indarctos*、*Parataxidea*、*Melodon*、*Eomellivora*、*Adcrocuta*、*Machairodus*, 奇蹄目的*Sinohippus*, 偶蹄目的*Cervavitus*、*Plesiaddax*、*Sinotragus*(Qiu等, 2013).

3.6 高庄阶

高庄阶是中国上新统的第一个阶, 得名于山西省榆社县云簇镇高庄村. 德日进和杨钟健发表了有关榆社的第一个地质报告, 发现华北地区的三趾马化石除在红土中有丰富的赋存外, 也产于河湖相沉积中(Teilhard de Chardin和Young, 1933). 邱占祥等(1987)在研究榆社盆地的三趾马时, 建议将榆社群划分为4个组, 自下而上为马会组、高庄组、麻则沟组和海眼组, 其时代分别为晚中新世、早上新世、晚上新世和早更新世, 并首次提出了高庄期(阶)的概念, 用以代表中国的早上新世(下上新统).

高庄阶的层型剖面位于榆社盆地桃阳-高庄-赵庄, 总厚340m. 由于第四系覆盖的原因, 不能直接观察到高庄组与下伏的马会组和上覆的麻则沟组的接触关系, 但在区域上高庄组与上、下两组间均为轻微的角度不整合(Tedford等, 2013).

高庄阶与国际地层年表中海相的赞克勒阶(Zanclean)对比, 同时高庄期也与欧洲陆生哺乳动物分期的

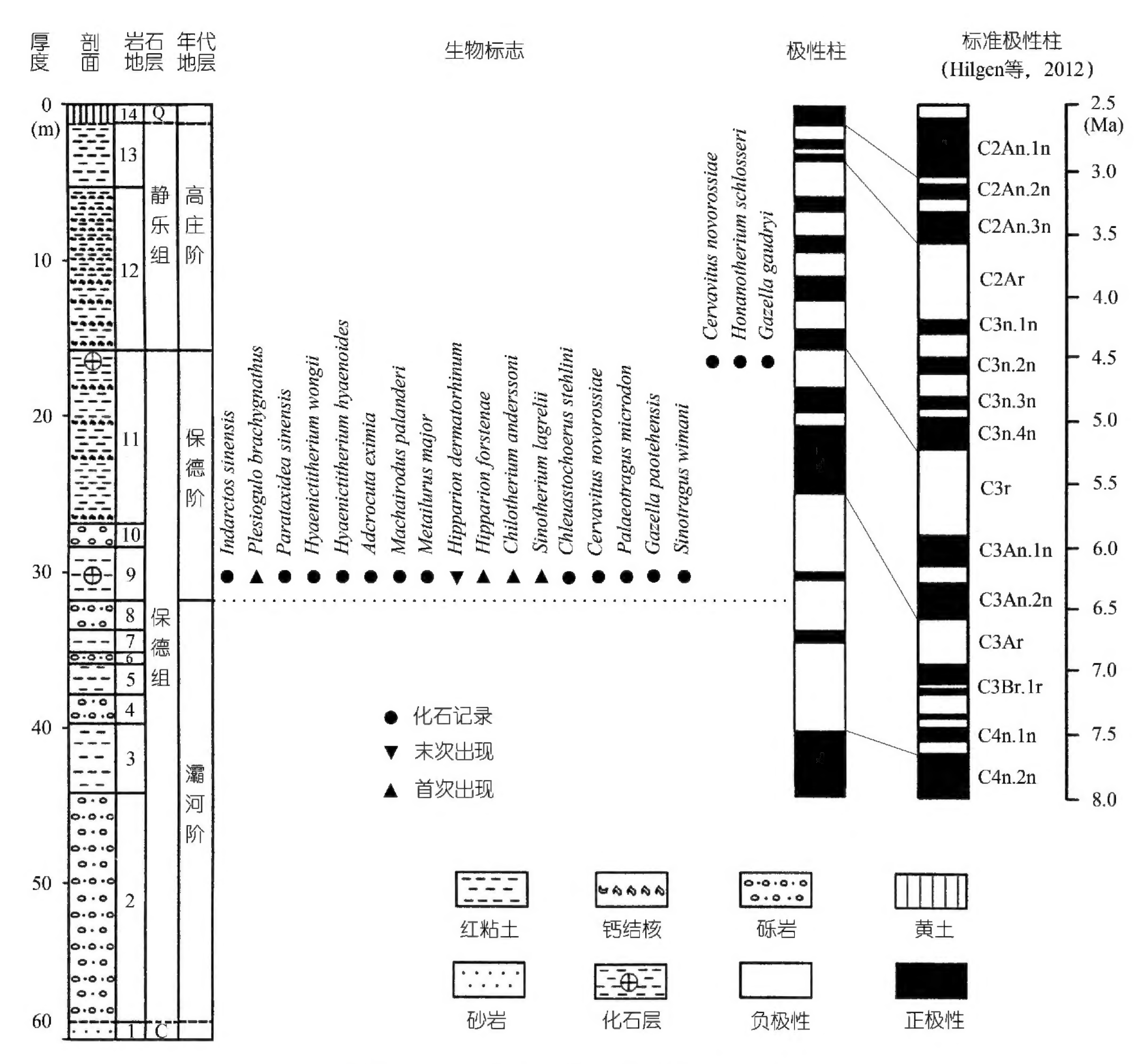


图 2　山西保德地区冀家沟地点地层综合剖面

路西尼期(Ruscinian)对比(Steininger等, 1996). 赞克勒阶的底界位于古地磁Chron C3r上部, 年龄为5.333Ma (Van Couvering等, 2000), 高庄阶的底界与其一致, 这条界线的精确位置在榆社桃阳剖面高庄组桃阳段第5层的土黄色块状砂岩近底部(邓涛等, 2010: 图2). 原始长鼻三趾马(*Hipparion pater*)在榆社盆地高庄组有较为广泛的分布, 发现的地点包括白海、泥河、大马岚、高庄、银郊、桑家沟、沤泥凹等地, 其首次出现的位置最接近高庄阶底界, 因此是重要的生物标志.

高庄期的三趾马动物群继承了保德期的特点, 并达到现代动物群的原始阶段. 大哺乳动物中保德期最特征的各种鼬鬣狗(除翁氏鬣形兽偶有发现)、副鬣狗、剑齿虎、多种三趾马的种都已不再出现, 犬科动物和驼类从北美迁入. 啮齿动物除始鼠科和山河狸科绝灭, 以及鼯鼠科出现外, 科一级与保德期一致. 在属一级, 保德期常见的一些成员在高庄期少见或消失, 同时还出现一些新的成员 (邱铸鼎和李强, 2016). 首现的属包括食虫目的*Desmana*、*Lunanosorex*, 啮齿目的*Allocricetus*、*Allorattus*、*Chardina*、*Mesosiphneus*、*Germanomys*、*Mimomys*(*Aratomys*), 兔形目的*Trischizolagus*, 食肉目的*Nyctereutes*、*Eucyon*、*Ursus*、*Pliocrocuta*、*Chasmaporthetes*, 奇蹄目的*Hipparion*(*Cremohipparion*)、*Hipparion*(*Plesiohipparion*)、*Proboscidipparion*、*Coelodonta*, 偶蹄目的*Sus*、*Para-*

camelus、*Muntiacus*、*Paracervulus*、*Axis*、*Antilospira*、*Lyrocerus*. 鼬鬣狗类和大唇犀类绝灭, 其他末现的属还包括食虫目的*Quyania*、*Parasoriculus*、*Paenelimnoecus*, 啮齿目的*Nannocricetus*、*Sinocricetus*、*Chardina*、*Lophocricetus*、*Paralophocricetus*、*Sinozapus*、*Pararhizomys*, 食肉目的*Plesiogulo*、*Simocyon*, 奇蹄目的*Hipparion*(*Hipparion*), 偶蹄目的*Chleuastochoerus*、*Dorcadoryx*(Qiu等, 2013).

3.7　麻则沟阶

麻则沟阶是中国上新统的第二个阶, 得名于山西省榆社县云簇镇赵庄村和白海村之间的麻则沟. 德日进和杨钟健在山西静乐的贺丰发现了包含6种大哺乳动物化石的贺丰动物群 (Teilhard de Chardin和Young, 1930). 此后, 杨钟健将静乐红土和贺丰动物群所处的时期命名为静乐期, 时代定为上新世中期(杨钟健, 1936). 李传夔等(1984)认为贺丰动物群所代表的确切时代并不清楚, 暂取静乐期代表中国的早上新世, 而以游河期代表晚上新世. 邱占祥和邱铸鼎(1990)认为静乐动物群本身的性质尚不清楚, 因而将整个上新世改称为榆社期, 分别以榆社盆地的高庄动物群和麻则沟动物群作为早、晚上新世的代表. 1999年第二届全国地层委员会正式建议建立中国上新统的年代地层单位高庄阶和麻则沟阶, 分别代表下上新统和上上新统.

麻则沟阶的层型剖面位于榆社盆地赵庄-大马岚剖面, 总厚度约95m, 麻则沟组下部出露较好; 位于大马岚西北约7km的西周村北剖面出露麻则沟组上部地层. 整个麻则沟组是一套厚约175m的以黄砂和紫红色粘土互层并逐步过渡到以粘土为主的沉积.

麻则沟阶与国际地层年表中的皮亚琴察阶(Piacenzian)对比, 后者的底界位于古地磁C2An之底, 即高斯期之底, 年龄为3.6Ma(Castradori等, 1998). 在榆社赵庄-大马岚剖面, 麻则沟阶的底界, 即古地磁高斯期3.6Ma的底界位于第6层麻则沟组下部紫红色粘土层中部 (邓涛和侯素宽, 2011: 图3), 麻则沟动物群产出这条界线之上.

在榆社盆地有精确层位的小哺乳动物化石中, 恰好在3.6Ma界线之上出现的种类是张洼沟姬鼠(*Apodemus zhangwagouensis*), 并有对应的晚中新世最晚期的更原始的谱系种邱氏姬鼠 (*A. qiui*)(Flynn等, 1997), 因此张洼沟姬鼠的首现可以作为麻则沟阶底界的生物标志.

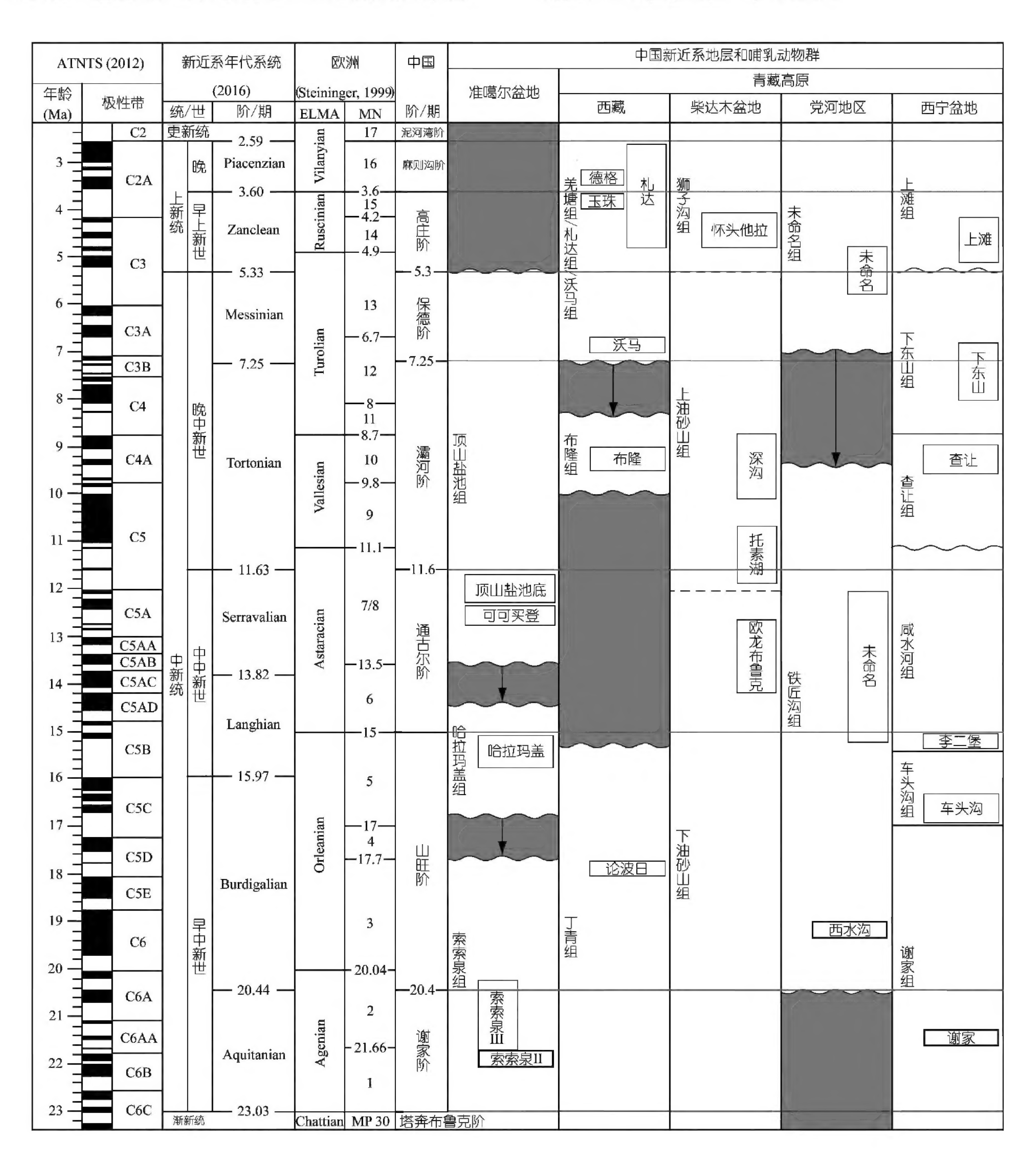
麻则沟期哺乳动物群包含大量高庄期动物群的残存类型, 如郊熊 (*Agriotherium*)、互棱齿象(*Anancus*)、三趾马属(*Hipparion*)的近三趾马亚属(*Plesiohipparion*)等, 同时也有许多现生种类的直接祖先. 首现的属为食虫目的*Beremendia*、兔形目的*Ochotonoides*, 啮齿目的*Cricetulus*, 食肉目的*Vulpes*、*Canis*、*Meles*、*Homotherium*、*Lynx*、*Sivapanthera*, 长鼻目的*Mammuthus*, 蹄兔目的*Postschizotherium*, 偶蹄目的*Sus*、*Pseudois*、*Magalovis*、*Ovis*. 末现的属为食虫目的*Yanshuella*, 兔形目的*Hypolagus*、*Trischizolagus*, 啮齿目的*Atlantoxerus*、*Pliopetaurista*、*Dipoides*、*Paralactaga*、*Kowalskia*、*Germanomys*、*Pseudomeriones*、*Huaxiamys*、*Chardina*、*Mesosiphneus*, 食肉目的*Eucyon*、*Enhydriodon*、*Pliocrocuta*, 偶蹄目的*Lyrocerus*(Qiu等, 2013).

4　磁性地层和化学地层

由于中国新近系进行同位素年龄测定的材料较少, 可在建阶层型剖面地点应用的高精度测年数据仅有山东临朐的山旺剖面(He等, 2011). 因此, 目前在中国新近系研究中最广泛应用的时间标尺是磁性地层学. 在许多陆相新近系的代表性剖面都进行过详细的古地磁测年工作, 如作为各个新近系的建阶候选层型剖面, 包括青海湟中谢家剖面(武力超等, 2006; Dai等, 2006; Xiao等, 2012)、新疆准噶尔盆地北缘索索泉剖面(Zhang等, 2007)、内蒙古苏尼特左旗通古尔剖面(Wang等, 2003)、陕西蓝田灞河剖面(Kaakinen, 2005)、甘肃东乡郭泥沟剖面(Fang等, 2016)、陕西保德冀家沟(岳乐平等, 2004) 和杨家沟(Zhu等, 2008) 等剖面、山西榆社高庄-麻则沟剖面(Flynn等, 1995) 等. 古地磁方法可以高精度地划分地层并定年, 但需要至少有一个可靠的年代依据约束, 而哺乳动物由于进化速度快, 其化石在确定含化石地层的年代上明显优于无脊椎动物和植物, 所以哺乳动物化石和古地磁测年恰可优势互补. 不过, 在过去的实践中可以看到, 对磁性地层学中用于时代约束的哺乳动物化石, 常常由于层位和时限的误用, 导致古地磁年龄出现偏差, 因此与精细的生物地层学工作的结合至关重要 (图3).

南海的钻孔中获取了32Ma以来的沉积记录, 涵盖整个晚新生代, 根据有孔虫的稳定氧、碳同位素分析, 在古地磁测年工作的配合下记录了新近纪的一系列气

候事件(汪品先等, 2003). 不过, 钻井剖面, 尤其是深海钻井剖面不适合建立年代地层单位的层型. 中国大陆上的新近系主要为陆相地层, 虽然在不少剖面也做了沉积物中碳酸盐和哺乳动物化石牙齿釉质的稳定碳、氧同位素的分析(Wang和Deng, 2005), 但其连续性较差, 其中沉积物碳酸盐受成岩作用的影响也很大, 所以其解释结果对新近纪气候环境变化的反映还需要在精度和准确度上做进一步的提高.



5 中国各大区主要对比格架

中国的新近纪地层以陆相沉积为主，海相新近系分布极为局限，发育较好、并有连续剖面的海相新近系仅见于台湾地区的中央山脉地带，但它们已经变质. 我国大陆上的新近纪地层几乎全为陆相沉积(图3)，仅在塔里木盆地南缘曾发现中新世的海相微体化石(Ritts等, 2008).

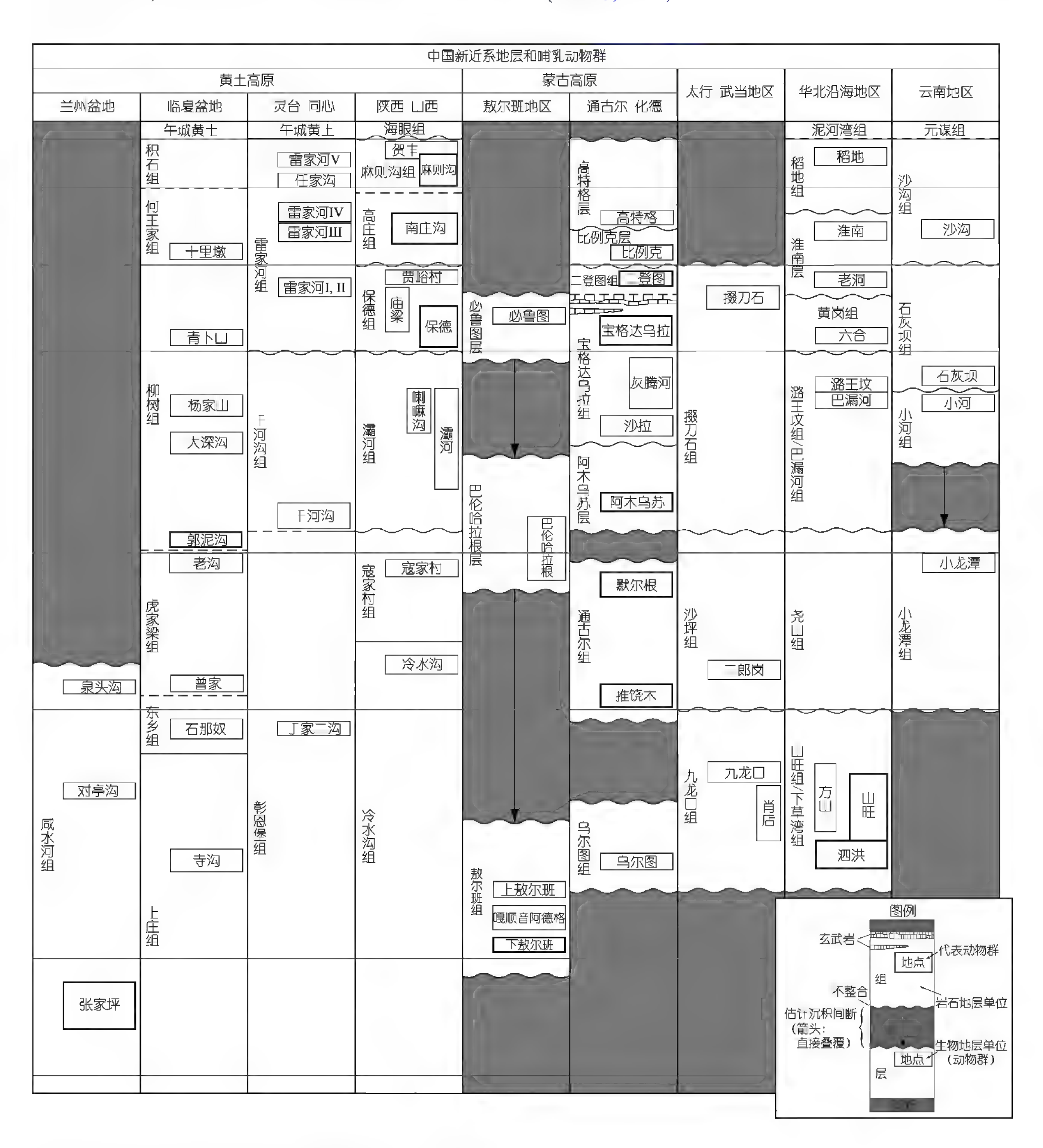


图 3 中国陆相新近纪地层及哺乳动物群的分布和对比

5.1 中国北方的新近系

中国北方的新生代沉积盆地分布广泛, 沉积厚度大, 发育良好的新近纪地层, 并富含哺乳动物化石. 北疆地区的准噶尔、吐鲁番-哈密两大盆地的新近系为河湖相沉积, 粗碎屑岩和土状堆积较发育. 南疆地区以陆相沉积为主, 局部地区有海陆过渡相沉积的分布. 祁连-贺兰地区以湖相沉积和土状堆积为主. 内蒙古-大兴安岭地区的新近系河湖相沉积发育, 厚度一般较小, 其中二连盆地和锡林浩特等地出露广泛, 局部地区有玄武岩分布. 东北地区的新近系分布零星, 以河流相沉积为主, 并有不同地质时期的玄武岩出露, 局部地区有土状堆积. 华北地区的新近系以河流相或湖相沉积和土状堆积为主, 尤以三趾马红土分布更为广泛, 个别地区有玄武岩出露(郑家坚等, 1999). 在中国北方的多个地区都有完整而连续的新近系剖面, 以甘肃临夏盆地最为典型, 其新近系剖面自下而上由中新统上庄组、东乡组、虎家梁组和柳树组, 上新统何王家组和积石组构成.

该区的谢家阶地层发育于新疆准噶尔盆地、甘肃兰州盆地和临夏盆地; 山旺阶地层出露于山东临朐-昌乐地区、甘肃党河盆地、临夏盆地和兰州盆地、内蒙古中部地区、江苏泗洪地区; 通古尔阶地层分布于新疆准噶尔盆地、甘肃临夏盆地和兰州盆地、宁夏同心地区、陕西蓝田地区、内蒙古中部地区; 灞河阶地层沉积于甘肃临夏盆地、宁夏中宁地区、陕西蓝田地区和府谷地区、内蒙古中部地区、河南新乡地区、山东章丘地区; 保德阶地层发育于甘肃临夏盆地和灵台地区、山西保德地区和榆社盆地、陕西蓝田地区和府谷地区、内蒙古中部地区; 高庄阶地层出露于甘肃临夏盆地、灵台地区和秦安地区、山西榆社盆地、内蒙古中部地区; 麻则沟阶地层分布于甘肃灵台地区、山西榆社盆地和静乐地区、陕西渭南地区、河北泥河湾盆地、北京周口店地区.

5.2 中国南方的新近系

西南地区的新近系主要是含褐煤的湖沼相沉积, 分布较广, 以滇东最具代表性. 扬子地区为湖相或河流相沉积, 尽管分布分散, 但具有一定的特点, 其出露地区还常见玄武岩. 南岭地区的新近系出露零星, 分布局限, 一般为河流相沉积. 岭南地区为河流相沉积, 常见有玄武岩出露, 在雷琼地区分布有浅海或滨海相沉积. 东南地区的新近系为河湖相沉积和火山岩, 在沿海边缘地区有海相或海陆过渡相的沉积. 台湾地区的新近系也为浅海相和海陆过渡相沉积. 岭南地区有一些相对比较完整和连续的新近系剖面, 如茂名盆地中新统和上新统剖面自下而上为黄牛岭组、尚村组、老虎岭组和高棚岭组, 但其中均未发现哺乳动物化石, 因此其时代的确定尚有一些疑问(郑家坚等, 1999).

该区的谢家阶地层发育于滇西地区和贵州翁哨盆地, 山旺阶地层出露于滇西地区和苏北地区, 通古尔阶地层分布于湖北房县盆地、云南开远盆地, 灞河阶地层沉积于云南元谋盆地和禄丰盆地, 保德阶地层发育于湖北荆州地区、江苏南京地区、云南昭通盆地, 高庄阶地层出露于安徽淮南地区、云南元谋盆地, 麻则沟阶地层分布于云南元谋盆地.

5.3 青藏高原的新近系

青藏高原的新近系多为含有褐煤的湖泊、沼泽相沉积以及土状堆积. 藏南地区吉隆盆地的沃马组和札达盆地的札达组为砂、泥岩沉积; 藏中地区的中新统为含煤碎屑岩或火山岩夹碎屑岩沉积; 藏北和羌塘地区的新近系除比如和班戈等地的碎屑岩沉积外, 多为火山岩分布. 柴达木盆地沉积了连续的新近系地层, 以河湖相碎屑岩为主, 局部夹泥灰岩. 西宁盆地的新近系也连续沉积, 主要为河湖相地层, 下部碎屑岩中夹有石膏层. 青藏高原地区的新近系以柴达木盆地的沉积较为完整和连续, 以中新统的油砂山组和上新统狮子沟组为代表, 但哺乳动物化石还较少且不够连续.

该区的谢家阶地层发育于青海西宁盆地, 山旺阶地层出露于青海西宁盆地、西藏伦坡拉盆地, 通古尔阶地层分布于青海柴达木盆地和西宁盆地, 灞河阶地层沉积于西藏布隆盆地、青海柴达木盆地和西宁盆地, 保德阶地层发育于西藏吉隆盆地和达涕盆地、青海西宁盆地, 高庄阶地层出露于青海昆仑山口盆地、西宁盆地和柴达木盆地、西藏札达盆地, 麻则沟阶地层分布于四川德格地区、西藏札达盆地.

6 结论和存在问题

中国的新近纪地层划分对比工作结合生物地层学、磁性地层学和同位素年代学方法, 充分利用各个

沉积盆地, 尤其是华北地区的丰富哺乳动物化石记录, 目前已建立了一个完整的年代地层框架, 并已被国际同行广泛接受为代表亚洲地区的核心方案(Wang等, 2013; Woodburne等, 2013). 实际上, 自2012年起, 中国新近系以陆生哺乳动物为依据建立的年代地层框架就已被作为亚洲标准与北美和欧洲的划分方案并列(Gradstein等, 2012).

不过, 由于中国新近纪地层的划分对比主要依据陆生哺乳动物化石, 与海相地层相比还存在着一些问题. 哺乳动物本身在分布上具有强烈的地域性, 在数量上过度稀少, 且大多残缺不全, 使得陆相地层的划分在原则、方法和工作程序上都有别于主要依据无脊椎动物划分的海相地层. 陆相地层和哺乳动物化石在地层划分中的重要作用在《国际地层指南》中没有得到应有的体现, 缺少国际性规范的结果, 各大洲不得不各自建立单独的陆相地层划分体系.

因此, 我们将继续以《国际地层指南》为工作原则, 对中国新近系已建立的以哺乳动物化石为依托、以阶为基础的年代地层框架进行深入的研究和完善. 只要我们遵循《国际地层指南》的基本原则, 采取正确的方法和工作程序, 即以哺乳动物化石为主要生物标志, 以磁性地层学为主要测年手段, 严格进行海陆精细对比, 这一任务在不久的将来就有可能完成.

致谢　衷心感谢邱占祥院士、邱铸鼎研究员、Lawrence Flynn博士、王晓鸣研究员、孟津研究员在野外考察和室内研究中的指导与帮助.

参考文献

邓涛, 侯素宽. 2011. 中国陆相上新统麻则沟阶. 地层学杂志, 35: 237–249

邓涛, 侯素宽, 史勤勤. 2015. 中国陆相上中新统灞河阶底界层型的选择. 地球学报, 36: 523–532

邓涛, 侯素宽, 王太明, 穆永清. 2010. 中国陆相上新统高庄阶. 地层学杂志, 34: 225–240

李传夔, 邱铸鼎. 1980. 青海西宁盆地早中新世哺乳动物化石. 古脊椎动物学报, 18: 198–214

李传夔, 吴文裕, 邱铸鼎. 1984. 中国陆相新第三系的初步划分与对比. 古脊椎动物学报, 22: 163–178

刘东生, 丁梦麟, 高福清. 1960. 西安蓝田间新生界地层剖面. 地质科学, (4): 199–208

孟津, 叶捷, 吴文裕, 岳乐平, 倪喜军. 2006. 准噶尔盆地北缘谢家阶底界——推荐界线层型及其生物-年代地层和环境演变意义. 古脊椎动物学报, 44: 205–236

裴文中, 周明镇, 郑家坚. 1963. 中国的新生界. 北京: 科学出版社. 1–31

邱占祥, 黄为龙, 郭志慧. 1987. 中国的三趾马化石. 中国古生物志, 新丙种, 25: 1–250

邱占祥, 邱铸鼎. 1990. 中国晚第三纪地方哺乳动物的排序及其分期. 地层学杂志, 14: 241–260

邱铸鼎, 李强. 2016. 内蒙古中部新近纪啮齿类动物. 中国古生物志, 新丙种, 30: 1–684

童永生, 郑绍华, 邱铸鼎. 1995. 中国新生代哺乳动物分期. 古脊椎动物学报, 33: 290–314

汪品先, 赵泉鸿, 翦知湣, 成鑫荣, 黄维, 田军, 王吉良, 李前裕, 李保华, 苏新. 2003. 南海三千万年的深海记录. 科学通报, 48: 2206–2215

王泽九, 黄枝高, 姚建新, 马秀兰. 2014. 中国地层表及说明书的特点与主要进展. 地球学报, 35: 271–276

武力超, 岳乐平, 王建其, Heller F, 邓涛. 2006. 新近系谢家阶层型剖面古地磁年代学研究. 地层学杂志, 30: 50–53

杨钟健. 1936. 三门系之历史的检讨. 地质论评, 1: 323–330

岳乐平, 邓涛, 张云翔, 王建其, 张睿, 杨利荣, Heller F. 2004. 保德阶层型剖面磁性地层学研究. 地层学杂志, 28: 48–51

郑家坚, 何希贤, 刘淑文, 李芝君, 黄学诗, 陈冠芳, 邱铸鼎. 1999. 中国地层典, 第三系. 北京: 地质出版社. 1–163

Castradori D, Rio D, Hilgen F J, Lourens L J. 1998. The Global Standard Stratotype-section and Point (GSSP) of the Piacenzian Stage (Middle Pliocene). Episodes, 21: 88–93

Chiu C S, Li C K, Chiu C T. 1979. The Chinese Neogene: A preliminary review of the mammalian localities and faunas. Ann Geol Pays Hellen, Hors Serie, (1): 263–272

Dai S, Fang X, Dupont-Nivet G, Song C, Gao J, Krijgsman W, Langereis C, Zhang W. 2006. Magnetostratigraphy of Cenozoic sediments from the Xining Basin: Tectonic implications for the northeastern Tibetan Plateau. J Geophys Res, 111: B11102

Deng T. 2006. Chinese Neogene mammal biochronology. Vert PalAsiat, 44: 143–163

Deng T, Hou S K. 2014. The Neogene terrestrial chronostratigraphic sequence of China. In: Rocha R, Pais J, Finney S, Kullberg J C, eds. STRATI 2013: First International Congress on Stratigraphy at the Cutting Edge of Stratigraphy. Cham: Springer. 1009–1012

Deng T, Hou S K, Wang H J. 2007. The Tunggurian Stage of the continental Miocene in China. Acta Geol Sin, 81: 709–721

Deng T, Qiu Z X, Wang B Y, Wang X M, Hou S K. 2013. Late Cenozoic biostratigraphy of the Linxia Basin, northwestern China. In: Wang X M, Flynn L J, Fortelius M, eds. Fossil Mammals of Asia: Neogene Biostratigraphy and Chronology. New York:

Columbia University Press. 243–273
Falconer H. 1868. On the fossil rhinoceros of central Tibet and its relation to the Recent upheaval of the Himalayahs. In: Murchison C, ed. Paleontological Memoirs and Notes of the Late Hugh Falconer, Vol. I. London: R Hardwicke. 173–185
Fang X, Wang J, Zhang W, Zan J, Song C, Yan M, Appel E, Zhang T, Wu F, Yang Y, Lu Y. 2016. Tectonosedimentary evolution model of an intracontinental flexural (foreland) basin for paleoclimatic research. Glob Planet Change, 145: 78–97
Flynn L J, Qiu Z X, Opdyke N D, Tedford R H. 1995. Ages of key fossil assemblages in the late Neogene terrestrial record of northern China. Soc Econ Paleont Miner Spec Publ, 54: 365–373
Flynn L J, Wu W, Downs III W R. 1997. Dating vertebrate microfaunas in the late Neogene record of Northern China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 133: 227–242
Gradstein F M, Ogg J, Schmitz M D, Ogg G. 2012. The Geologic Time Scale 2012. Amsterdam: Elsevier. 1–1176
He H, Deng C, Pan Y, Deng T, Luo Z, Sun J, Zhu R. 2011. New ^{40}Ar/^{39}Ar dating results from the Shanwang Basin, eastern China: Constraints on the age of the Shanwang Formation and associated biota. Phys Earth Planet Inter, 187: 66–75
Hedberg H D. 1976. International Stratigraphic Guide: A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure. New York: Wiley. 1–200
Hilgen F, Aziz H A, Bice D, Iaccarino S, Krijgsman W, Kuiper K, Montanari A, Raffi I, Turco E, Zachariasse W J. 2005. The Global boundary Stratotype Section and Point (GSSP) of the Tortonian Stage (Upper Miocene) at Monte dei Corvi. Episodes, 28: 6–17
Hilgen F J, Iaccarino S, Krijgsman W, Villa G, Langereis C G, Zachariasse W J. 2000. The Global boundary Stratotype Section and Point (GSSP) of the Messinian Stage (uppermost Miocene). Episodes, 23: 172–178
Hilgen F J, Lourens L J, Van Dam J A. 2012. The Neogene Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M K, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012. Amsterdam: Elsevier. 923–978
Kaakinen A. 2005. A Long Terrestrial Sequence in Lantian: A Window into the Late Neogene Palaeoenvironments of Northern China. Helsinki: Yliopistopaino. 1–49
Koken E. 1885. Über fossile Säugethiere aus China. Pal Abh, 3: 31–113
Meng J, Ye J, Wu W Y, Ni X J, Bi S D. 2013. A single-point base definition of the Xiejian Age as an exemplar for refining Chinese land mammal ages. In: Wang X M, Flynn L J, Fortelius M, eds. Fossil Mammals of Asia: Neogene Biostratigraphy and Chronology. New York: Columbia University Press. 124–141
Ogg J G, Ogg G, Cradstein F M. 2016. A Concise Geologic Time Scale 2016. Amsterdam: Elsevier. 1–213
Qiu Z X. 1989. The Chinese Neogene mammalian biochronology: Its correlation with the European Neogene mammalian zonation. NATO ASI Ser A, 180: 527–556
Qiu Z, Qiu Z. 1995. Chronological sequence and subdivision of Chinese Neogene mammalian faunas. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 116: 41–70
Qiu Z X, Qiu Z D, Deng T, Li C K, Zhang Z Q, Wang B Y, Wang X M. 2013. Neogene land mammal stages/ages of China: Toward the goal to establish an Asian land mammal stage/age scheme. In: Wang X M, Flynn L J, Fortelius M, eds. Fossil Mammals of Asia: Neogene Biostratigraphy and Chronology. New York: Columbia University Press. 29–90
Qiu Z X, Wu W Y, Qiu Z D. 1999. Miocene mammal faunal sequence of China: Palaeozoogeography and Eurasian relationships. In: Rössner G E, Heissig K, eds. The Miocene Land Mammals of Europe. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil. 443–455
Ritts B D, Yue Y, Graham S A, Sobel E R, Abbink O A, Stockli D. 2008. From sea level to high elevation in 15 million years: Uplift history of the northern Tibetan Plateau margin in the Altun Shan. Am J Sci, 308: 657–678
Salvador A, ed. 1994. International Stratigraphic Guide: A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure. 2nd ed. Trondheim and Boulder: IUGS and GSA. 1–214
Spock L E. 1929. Pliocene beds of the Iren Gobi. Am Mus Novit, 394: 1–8
Steininger F F. 1999. Chronostratigraphy, geochronology and biochronology of the Miocene “European Land Mammal Mega-Zones” (ELMMZ) and the Miocene “Mammal-Zones (MN-Zones)”. In: Rössner G E, Heissig K, eds. The Miocene Land Mammals of Europe. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil. 9–24
Steiniger F F, Aubry M P, Berggren W A, Biolzi M, Borsetti A M, Cartlidge J E, Cati F, Corfield R, Gelati R, Iaccarino S, Napoleone C, Ottner F, Rögl F, Roetzel R, Spezzaferri S, Tateo F, Villa G, Zevenboom D. 1997. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Neogene. Episodes, 20: 23–28
Steininger F F, Berggren W A, Kent D V, Bernor R L, Sen S, Agusti J. 1996. Circum-Mediterranean Neogene (Miocene and Pliocene) marine-continental chronologic correlation of European mammal units. In: Bernor R L, Fahlbusch V, Mittmamm H W, eds. The Evolution of Western Eurasian Neogene Mammal Faunas. New York: Columbia University Press. 7–46
Tedford R H. 1995. Neogene mammalian biostratigraphy in China: Past, present and future. Vert PalAsiat, 33: 272–289
Tedford R H, Qiu Z X, Flynn L J, eds. 2013. Late Cenozoic Yushe Basin, Shanxi Province, China: Geology and Fossil Mammals. Dordrecht: Springer. 1–109

Teilhard de Chardin P, Leroy P. 1942. Chinese fossil mammals: A complete bibliography analysed, tabulated, annotated and indexed. Inst Geo-Bio Pekin, 8: 1–142

Teilhard de Chardin P, Young C C. 1930. Preliminary observations on the pre-Loessic and post-Pontian formations in western Shansi and northern Shensi. Mem Geol Surv China, Ser A, 8: 1–54

Teilhard de Chardin P, Young C C. 1933. The Late Cenozoic formations of S. E. Shansi. Bull Geol Soc China, 12: 207–248

Van Couvering J A, Castradori D, Cita M B, Hilgen F J, Rio D. 2000. The base of the Zanclean Stage and of the Pliocene Series. Episodes, 23: 179–187

Wang S Q, Deng T. 2011. The first *Choerolophodon* (Proboscidea, Gomphotheriidae) skull from China. Sci China Earth Sci, 54: 1326–1337

Wang X M, Flynn L J, Fortelius M, eds. 2013. Fossil Mammals of Asia: Neogene Biostratigraphy and Chronology. New York: Columbia University Press. 1–732

Wang X M, Qiu Z D, Li Q, Tomida Y, Kimura Y, Tseng Z J, Wang H J. 2009. A new Early to Late Miocene fossiliferous region in central Nei Mongol: Lithostratigraphy and biostratigraphy in Aoerban strata. Vert PalAsiat, 47: 111–134

Wang X M, Qiu Z D, Opdyke N D. 2003. Litho-, Bio-, and magnetostratigraphy and paleoenvironment of Tunggur Formation (Middle Miocene) in central Inner Mongolia, China. Am Mus Novit, 3411: 1–31

Wang Y, Deng T. 2005. A 25 m.y. isotopic record of paleodiet and environmental change from fossil mammals and paleosols from the NE margin of the Tibetan Plateau. Earth Planet Sci Lett, 236: 322–338

Woodburne M O, Tedford R H, Lindsay E H. 2013. North China Neogene biochronology. In: Wang X M, Flynn L J, Fortelius M, eds. Fossil Mammals of Asia: Neogene Biostratigraphy and Chronology. New York: Columbia University Press. 91–123

Xiao G, Guo Z, Dupont-Nivet G, Lu H, Wu N, Ge J, Hao Q, Peng S, Li F, Abels H A, Zhang K. 2012. Evidence for northeastern Tibetan Plateau uplift between 25 and 20 Ma in the sedimentary archive of the Xining Basin, Northwestern China. Earth Planet Sci Lett, 317-318: 185–195

Young C C. 1936. On the Cenozoic geology of Itu, Changlo and Linchü districts (Shantung). Bull Geol Soc China, 15: 171–187

Zhang R, Yue L P, Wang J Q. 2007. Magnetostratigraphic dating of mammalian fossils in Junggar Basin, northwest China. Chin Sci Bull, 52: 1526–1531

Zhu Y, Zhou L, Mo D, Kaakinen A, Zhang Z, Fortelius M. 2008. A new magnetostratigraphic framework for late Neogene *Hipparion* Red Clay in the eastern Loess Plateau of China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 268: 47–57

(责任编委: 沈树忠)